Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 13, No. 5, Dec- Jan 2018, p. 704-719

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 13، شماره 5، آذر - دی 1396، ص. 719-704

بررسی سینتیک انتقال جرم و مدل‌سازی ریاضی فرایند آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج در محلول‌های شربت گلوکز و نمک

مینا کارگزاری[1*] - مرتضی جمشید عینی[2]

تاریخ دریافت: 1395/03/04
تاریخ پذیرش: 1395/08/01

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی سینتیک انتقال جرم فرایند آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج با در نظر گرفتن شاخص‌های جذب مواد جامد (SG) و از دست دادن رطوبت (WL) انجام گرفت. این ارزیابی در محلول‌های اسمزی متشکل از شربت گلوکز در سه سطح غلظت (30، 40 و 50 درصد وزنی/وزنی) و نمک در سه سطح غلظت (5، 10 و 15 درصد وزنی/وزنی) و سه سطح دمای محلول اسمزی (30، 40 و 50°C) و به مدت 240 دقیقه انجام شد. داده‌های تجربی به دست آمده از انجام آزمایش‌ها با مدل‌های نیمه‌تجربی مختلف شامل مدل‌های Magee، Peleg و Page برازش شدند. پارامترهای آماری ضریب تبیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) به منظور تعیین مناسب‌ترین مدل مورد استفاده قرار گرفتند. در میان مدل‌های برازش یافته، مدل Peleg به خوبی داده‌های آزمایشی مربوط به SG (R^2=0/81، χ^2 =0/006 و RMSE =0/027)؛ و مدل Page به شکل رضایت‌بخشی داده‌های آزمایشی مربوط به WL را توصیف نمودند (R^2=0/97، χ^2 =0/003 و RMSE =0/005). منحنی‌های مربوط به داده‌های آزمایشی و همچنین منحنی‌های مربوط به داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌های Magee، Peleg و Page، رسم شدند. مشاهده شد که مدل‌های ارائه شده توسط Peleg و Page نسبت به مدل Magee قابلیت بهتری در پیش‌بینی سینتیک‌های فرایند آبگیری اسمزی و مقادیر SG و WL تعادلی داشتند.

واژه‌های کلیدی: آبگیری اسمزی، سینتیک انتقال جرم، مدل‌سازی ریاضی، برازش، هویج.

مقدمه

تولید جهانی محصولات باغی معادل 434/7 میلیون تن میوه و معادل 90 میلیون تن سبزی در سال برآورد شده است (Chavan & Amarowicz, 2012). تنوع این نوع محصولات موجب افزایش میزان تولیدات باغی شده، چنانچه این رقم به 185/2 بیلیون تن در سال 2010 رسیده است اما چالش واقعی پس از تولید آغاز می‌گردد (Yadav & Singh, 2014). از آنجائیکه افت پس از برداشت میوه و سبزی در کشورهای در حال توسعه به‌طور قابل توجهی بالاست، تکنیک‌های متعددی به منظور نگهداری میوه‌جات و سبزیجات به کار برده می‌شود. در این میان فرایند خشک کردن و آبگیری، به دلیل صرفه‌جویی در بسته‌بندی و انبار و غیره بسیار حائز اهمیت است (Chavan & Amarowicz, 2012). در سال‌های اخیر، مواد غذایی با رطوبت میانه[3] (IMF) تولید شده با بکارگیری روش آبگیری اسمزی به دلیل اعمال حداقل فرایند[4] در میان مصرف‌کنندگان رواج بسیاری یافته است. آبگیری اسمزی یک پیش‌تیمار[5] فرایندهای سنتی نظیر خشک کردن و انجماد به‌شمار می‌رود که موجب افزایش کیفیت فراورده‌ی نهایی به دلیل ممانعت از قهوه‌ای شدن اکسیداتیو و افت ترکیبات طعمی فرار و کاهش فروریختگی ساختار[6] طی فرایند بعدی محصولات کشاورزی می‌گردد (Júnior *et al.*, 2013). فرایند آبگیری اسمزی در عین کم هزینه بودن مصرف انرژی پایینی دارد و نیازمند هزینه‌های سرمایه‌گذاری پایینی می‌باشد، همچنین شیوه‌ای برای عرضه سبزیجات ارزان، فسادپذیر و ارزشمند مانند هویج در مناطق دور از نواحی تولید و همچنین در فصول غیر تولیدی را فراهم می‌سازد (Singh, Kumar, & Gupta, 2007). طی آبگیری اسمزی یک انتقال جرم غیرهمسو به دلیل اختلاف فشار اسمزی میان ماده غذایی و محلول اسمزی هایپرتونیک اتفاق می‌افتد: یکی نفوذ آب از

1و 2- به‌ترتیب استادیار و دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران‌شمال، تهران، ایران
(* - نویسنده مسئول (Email: mina_kargozari@ut.ac.ir
DOI: 10.22067/ifstrj.v1395i0.56206

3 Intermediate Moisture Food
4 Minimal processing
5 Pretreatment
6 Structure collapse

ماده غذایی به محلول اسمزی و دیگری نفوذ مواد حل‌شونده از محلول اسمزی به ماده غذایی. همچنین به دلیل نیمه‌تراوا بودن غشای سلولی، جریان سومی مربوط به مواد با وزن مولکولی کم مانند اسیدهای آلی، ساکاریدها، ویتامین‌ها و نمک‌های معدنی از ماده غذایی به محلول هایپرتونیک روی می‌دهد. این جریان از لحاظ کمی چندان قابل ملاحظه نیست (Ahmed, Qazi, & Jamal, 2016; Sutar & Gupta, 2007). حذف رطوبت عمدتاً در اثر جریان موئین[1] و پدیده نفوذ[2] انجام می‌شود در حالیکه جذب مواد حل شده در محلول اسمزی توسط ماده غذایی تنها در اثر نفوذ روی می‌دهد. تمامی تبادلات جرمی انجام شده میان ماده غذایی و محلول هایپرتونیک می‌تواند بر کیفیت کلی و بازده فراورده آبگیری‌شده تأثیرگذار باشد (Ahmed *et al.*, 2016).

در تکنولوژی مواد غذایی، در ساده‌ترین سطح، معادلاتی حاکم هستند که رابطه میان دو یا چند متغیر را مشخص می‌سازند. شبیه‌سازی مبتنی بر مدل در واحدهای فرایند و نگهداری مواد غذایی توجه بسیاری را در چهار دهه اخیر به خود جلب کرده است. مدل‌سازی یقیناً می‌تواند در صنعت غذا تفاوت ایجاد کند و منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری گردد (Datta, 2008) و مدیریت و تصمیم‌گیری کارامدتری را به ارمغان آورد، اما در دسترس نبودن دانش و عدم قطعیت اندازه‌گیری‌های انجام شده، میزان بی‌نقص بودن[3] مدل‌ها و شبیه‌سازی‌ها را محدود کرده و عدم اطمینان[4] از پیشگویی‌ها را افزایش می‌دهد (Ivester, 2008). معادلات ریاضی توصیف‌کننده انتقال جرم طی آبگیری اسمزی، درک بهتر ترکیب ماده آبگیری شده و پارامترهای عملیاتی را میسر می‌سازند. در همین راستا مدل‌های نظری و تجربی بسیاری در منابع گزارش شده‌اند که مدل‌های تجربی به دلیل کاربرد راحت‌تر از محبوبیت بیشتری برخوردارند (Pavelkić *et al.*, 2015). در برخی از مدل‌سازی‌های تجربی رابطه بین متغیرها از یک تئوری به‌دست می‌آید ولی پارامترهای مدل با انجام آزمایش‌ها به‌دست می‌آیند. این نوع مدل‌سازی، نیمه‌تجربی[5] می‌باشد (Datta & Halder, 2008). مدل‌های نیمه‌تجربی متعددی همانند مدل Magee و همکاران (1983)، Azuara و همکاران، (1992) Palou و همکاران (1994) و Ferrari و همکاران (2011) به‌منظور توصیف انتقال جرم طی آبگیری اسمزی فراورده‌های غذایی گزارش شده‌اند (Júnior *et al.*, 2013). Ganjloo و همکاران (2012) سینتیک آبگیری اسمزی گواوای بی‌دانه را با بررسی شاخص‌های جذب مواد جامد[6] (SG) و افت رطوبت[7] (WL) تحت تأثیر غلظت ساکارز و دمای متغیر در بازه زمانی 240 دقیقه مورد بررسی قرار دادند. داده‌های آزمایشی با مدل‌های سینتیک نیمه‌تجربی برازش یافت. نتایج حاکی از آن بود که مدل تجربی Peleg به‌طور رضایت بخشی سینتیک آبگیری اسمزی گواوا را توصیف نمود (Ganjloo, Rahman, Bakar, Osman, & Bimakr, 2012). در مطالعه انجام شده توسط Souraki و همکاران (2012) فرایند انتقال جرم طی آبگیری اسمزی برش‌های استوانه‌ای لوبیا سبز در محلول نمک به‌عنوان تابعی از غلظت نمک در محلول اسمزی و دمای فرایند بررسی شد. یک مدل ریاضی دو پارامتری بسط یافته توسط Azuara و همکاران (1992) به منظور توصیف انتقال جرم و تخمین مقادیر تعادلی SG و WL به‌کار برده شد (Souraki, Ghaffari, & Bayat, 2012).

به دلیل فقدان داده‌های تجربی در زمینه آبگیری اسمزی هویج، هدف ما دستیابی به اطلاعات کاربردی بیشتر در طراحی و کنترل فرایند آبگیری اسمزی این سبزی بوده است. هدف از انجام این مطالعه بررسی سینتیک انتقال جرم به شکل SG و WL به عنوان تابعی از غلظت محلول‌های اسمزی، دما و زمان غوطه‌وری طی تیمار اسمزی هویج می‌باشد. همچنین ارزیابی امکان بکارگیری معادلات Magee، Peleg و Page به منظور مدل‌سازی داده‌های تجربی به دست آمده در شرایط مختلف فرایند آبگیری اسمزی و انتخاب بهترین مدل توصیف‌کننده سینتیک انتقال جرم از اهداف این پژوهش است.

تئوری

معادله Magee که در مطالعات پیشین به‌منظور توصیف سینتیک انتقال جرم در فرایند آبگیری اسمزی به‌کار رفته است (Hathan, 2015)، عبارت است از:

$$\overline{MC(t)} = \mathrm{A} \pm k\sqrt{t} \qquad (1)$$

در این معادله $\overline{MC(t)}$ میزان جذب مواد جامد یا افت رطوبت در زمان t، A و K پارامترهای مدل Magee و t نشان‌دهنده زمان می‌باشد (معادلهٔ 1) (Moreira & Sereno, 2003).

پارامترهای معادله دوپارامتری غیرلگاریتمی Peleg با استفاده از معادله زیر به‌دست می‌آید. این مدل قادر به توصیف اکثر منحنی‌های به دست آمده که به‌طور تقریبی به تعادل می‌رسند، می‌باشد:

$$\overline{MC(t)} = MC_0 \pm \frac{t}{K_1 + K_2 t} \qquad (2)$$

در این معادله $\overline{MC(t)}$ میزان جذب مواد جامد یا افت رطوبت در زمان t، MC_0 میزان جذب مواد جامد یا افت رطوبت اولیه، K_1 ثابت

1 Capillary flow
2 Diffusion
3 Sophistication
4 Uncertainty
5 Semi-empirical modeling
6 Solid gain
7 Water loss

سرعت Peleg[1] و K_2 ثابت ظرفیت Peleg[2] و t نشان‌دهنده زمان می‌باشد (Júnior *et al.*, 2013). در معادله Peleg علامت "±" در محاسبه‌ی افت رطوبت "-" و در مورد جذب مواد جامد "+" می‌شود (معادلهٔ 2) (Pavelkić *et al.*, 2015).

یکی از مفیدترین مدل‌های نیمه تجربی معادله Page می‌باشد:

$$W_{A\ or\ S} = \frac{MC(t)-MC_{eq}}{MC_0-MC_{eq}} = \exp(-Kt^n) \quad (3)$$

در این معادله W_A مقدار بدون بُعد افت رطوبت؛ W_S مقدار بدون بُعد جذب مواد جامد؛ MC_{eq} مقادیر تعادلی افت رطوبت و جذب مواد جامد می‌باشند. K و n پارامترهای Page و t نشان‌دهنده زمان می‌باشد (معادلهٔ 3) (Park, Bin, Brod, & Park, 2002).

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، هویج استفاده شده رقم محلی بوده و به‌منظور همگن شدن نمونه‌ها از یک سبزی فروشی و به‌صورت روزانه (به منظور جلوگیری از بروز خطای ناشی از رسیدن و از دست دادن رطوبت) تهیه شد. هویج مصرفی تا هنگام استفاده در دمای 4-5°C در یخچال نگهداری شد. از یک خلال‌کن دستی برای برش هویج به قطعات مکعبی شکل 1×1×1سانتی‌متر استفاده شد. مکعب‌ها شسته شدند تا خرده‌های هویج چسبیده به سطح آنها حذف شود و سپس آب آنها با دستمال خشک‌کن گرفته شد. محتوای رطوبت اولیه هویج بین 86 تا 90 درصد (وزن مرطوب) متغیر بود.

فرایند اسمز

با توجه به تأثیر بیشتر محلول‌های چند جزئی نسبت به محلول های تک جزئی، محلول دو گانه نمک و شربت گلوکز (DE=40/9، brix=82، گلوکزان قزوین) به‌عنوان محلول اسمزی انتخاب گردید. میزان شربت گلوکز در محلول اسمزی 30، 40 و50 (وزنی/ وزنی) و میزان نمک طعام 5، 10 و 15 (وزنی/ وزنی) بود. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی 30، 40 و 50°C انجام شدند. بنابراین در مجموع 27 تیمار آزمایشی انجام شد. نمونه‌ها با رعایت نسبت محلول به نمونه معادل 10 به 1 به بشر حاوی محلول اسمزی اضافه شد و برای جلوگیری از تبخیر آب، دهانه بشر با یک پوشش پلاستیکی بسته شد. دمای فرایند آبگیری اسمزی توسط دستگاه بنماری (Windaus-Lauda مدل E299، آلمان) کنترل شد. عمل آنزیم‌بری پیش از فرآیند اسمز انجام نشد زیرا این عمل به علت از دست رفتن خاصیت نیمه تراوی غشای سلولی، در فرآیند اسمز اختلال ایجاد کرده و نیز موجب کاهش بتاکاروتن هویج می‌گردد. نمونه‌ها پس از طی زمان‌های 15، 30، 60، 120، 180 و 240 دقیقه، از محلول اسمزی خارج شدند. به دلیل اهمیت ثابت ماندن نسبت محلول به نمونه در تمامی آزمایش‌ها برای هر زمان انتخابی، بشر جداگانه‌ای حاوی سه قطعه هویج (تکرار) در نظر گرفته شد. پس با توجه به سطوح در نظر گرفته شده برای پارامترهای مستقل آبگیری اسمزی و تعداد 6 نقطه‌ی زمانی، تعداد کل برش‌های مکعبی هویج 486 عدد بود. مکعب‌های هویج پس از خروج از محلول هایپرتونیک، با آب مقطر دیونیزه شسته شده و با استفاده از کاغذ حوله‌ای خشک‌کن، آب اضافی آنها گرفته شد (Kargozari, Moini, & Emam-Djomeh, 2010).

تعیین سینتیک انتقال جرم

مکعب‌های هویج تازه و اسمز شده پس از گذشت زمان‌های غوطه‌وری مشخص شده در اُون (Heraeus Vacutherm VT6025، آلمان) در دمای 105°C تا رسیدن به وزن ثابت (به مدت 24 ساعت) قرار گرفتند، بدین ترتیب اندازه‌گیری محتوای رطوبت و مواد جامد مطابق متد AOAC شماره 931/04 (Horwutz, 2000) انجام شد. به‌منظور تعیین تغییرات وزنی، تمامی نمونه‌ها با دقت 0/0001 گرم قبل و بعد از تیمار توسط یک ترازوی دیجیتال (AND، HR200، ژاپن) به دقت توزین شدند. روابط زیر به‌منظور محاسبه مقادیر SG و WL به کار برده شدند:

$$WL_{(\frac{g}{g})} = \frac{(M_0-m_0)-(M_t-m_t)}{M_0} \quad (4)$$

$$SG_{(\frac{g}{g})} = \frac{(M_t-m_0)}{M_0} \quad (5)$$

در روابط بالا M عبارت است از وزن (g) و m وزن خشک نمونه (g) است. اندیس 0 و t به ترتیب بیانگر مقادیر اولیه و هر زمان نمونه‌برداری است (رابطه 1 و2).

مدل‌سازی ریاضی سینتیک انتقال جرم

در طبقه‌بندی مدلینگ فرایندهای غذایی، مدل‌های سینتیکی در میان مدل‌های نظری قرار گرفته‌اند. در صورتیکه بتوانیم از مدل‌های سینتیک مبتنی بر بینش علمی بنیادی (فیزیک) برای مقاصد پیشگویی و کنترل تغییراتی که در مواد غذایی واقعی روی می‌دهد استفاده کنیم، این وضعیت بهترین حالت ممکن خواهد بود. اما پیچیدگی مواد غذایی به حدی است که کاربرد مستقیم مدل‌های بنیادی در سیستم‌های غذایی را غیرممکن می‌سازد. چاره این است که سینتیک‌ها مستقیماً در مواد غذایی واقعی مطالعه شوند. در نتیجه مدل‌های به‌دست آمده، تجربی یا در بهترین حالت نیمه تجربی خواهند بود. سینتیک به عنوان یک ابزار بسیار قوی در مدل‌سازی ویژگی‌های کیفی مواد غذایی توسعه یافته است و به عبارتی مدل‌سازی برآورد کیفیت غذایی تقریباً معادل مدل‌سازی سینتیک

---

1 Peleg's rate constant
2 Peleg's capacity constant

واکنش‌ها در مواد غذایی مـی‌باشـد (Van Boekel, 2008). در ایـن پژوهش سینتیک انتقال جرم طی فرایند آبگیری اسمزی مکعب‌هـای هویج با سه مدل ریاضی که به‌طور گسترده‌ای برای مواد بیولوژیک و بیشتر مواد غذایی به‌کار می‌روند برازش شد و بدین ترتیب پارامترهای مدل‌ها تعیین گردید. بـرازش داده‌هـای آزمایشـگاهی بـا مـدل‌هـای نیمه‌تجربی توسط صفحه گسترده[1] مایکروسافت Excel (Microsoft Office, 2010) با استفاده از SOLVER add-in انجام شـد (Hii, Law, & Cloke, 2009). SOLVER یک ابزار قدرتمند مـی‌باشـد که به طور وسیعی در صفحات گسترده در دسـترس بـوده و بـا یـک دستورالعمل ساده، امکان برازش داده‌های تجربی با توابع غیرخطی را فراهم می‌سازد (Harris, 1998). به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل توصـیف‌کننـده سـینتیک آبگیـری اسـمزی مکعـب‌هـای هـویج، از پارامترهای آماری نظیر ضریب تبیین (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشـه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. این شـاخص‌هـا توسـط روابط زیر محاسبه شدند:

$$X^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i}-MR_{pre,i})^2}{N-z}\right] \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2\right)} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{n}^{i=1}(MR_{exp}-MR_{pre})^2}{\sum_{n}^{i=1}(MR_{exp}-\overline{MR})^2}\right] \quad (8)$$

در این روابط $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبـت هـویج مشـاهده شـده در iاُمین اندازه‌گیری، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت پیش‌بینی شده هویج توسط مدل در iاُمین اندازه‌گیری، $\overline{MR}$ نسبت رطوبت تجربی میـانگین، N تعداد مشاهده‌ها و z تعداد ضرایب مدل است (روابط3، 4 و5). در انتها مدل برازش یافته با حداکثر ضریب تبیین R^2 و حداقل RMSE و χ^2 به عنوان بهترین مدل برای توصیف سینتیک آبگیری اسمزی هـویج انتخاب شد (Bashari, 2015).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

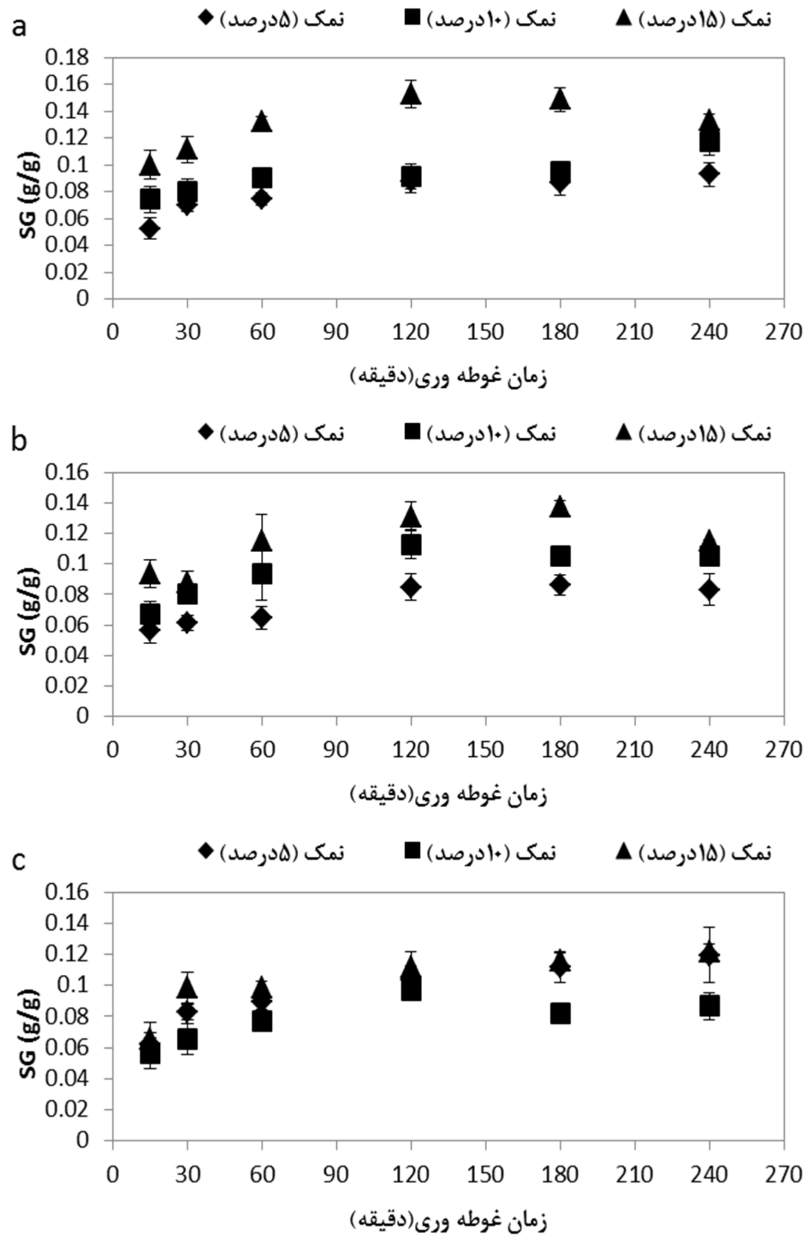
داده‌ها به‌صورت میانگین± انحراف استاندارد هر آزمون با در نظر گـرفتن سـه تکـرار نمـایش داده شـد. آنـالیز آمـاری در سیسـتم Statgraphics 5.0 Plus' نسخه 17.1.12(Statistical Graphics Corporation، هرندون، VA، USA) انجام شدند. اختلاف میانگین شاخص‌های SG و WL توسط آزمـون‌هـای بـازه چندگانـه دانکـن[2] مقایسه شدند و حد احتمال $p<0/05$ معنـی‌دار در نظـر گرفتـه شـد. نمودارها با کمـک نـرم‌افـزار Microsoft Office Excel نسـخه 14 ترسیم شدند.

1 Spreadsheet
2 Duncan's multiple range tests

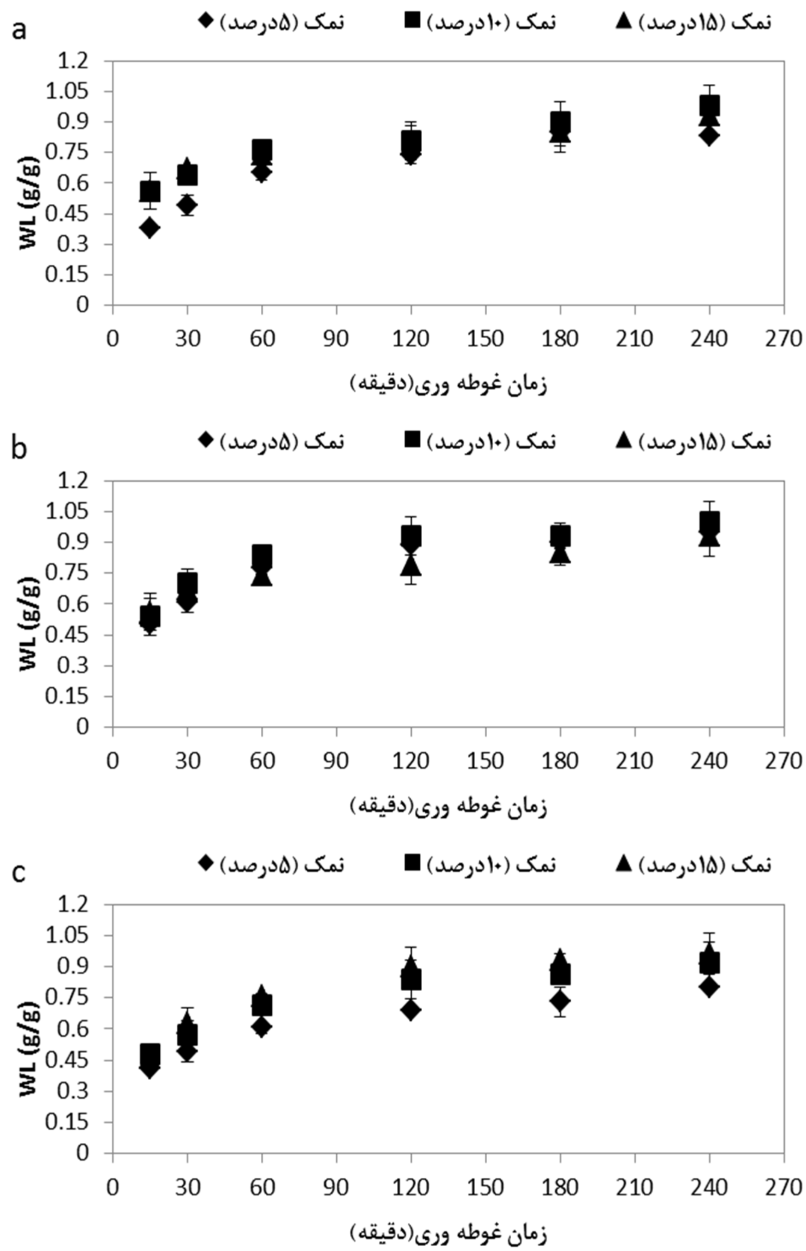
نتایج و بحث

شکل 1 و 2 روند تغییرات جذب مواد جامد و افت رطوبت را طـی تیمارهای اسمزی در غلظت ثابت شـربت گلـوکز (30%)، در دماهـا و غلظت‌های مختلف نمک نمایش می‌دهد. در غلظت‌های شربت گلوکز 40% و 50% روند تغییرات مشابهی در مورد SG و WL حـاکم اسـت (نمودارهای مربوط نمایش داده نشده). ملاحظه می‌شود کـه افـزایش غلظت نمک، میزان جذب مواد جامد را در بیشتر نقاط نمونه‌برداری به شکل معنی‌داری ($p<0/05$) افزیش داده (شکل 1) اما تأثیر معنی‌داری بر میزان آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج نداشت (شکل 2). افزایش در میزان جذب مواد جامد، منجر به انسداد لایه‌های سـطحی نمونـه شده و در نتیجه، کاهش گرادیان غلظت بین نمونه و محلول اسمزی موجب مقاومت در برابـر انتقـال جـرم و عـدم افـزایش نـرخ WL در غلظـت‌هـای بـالای نمـک در زمـان فراینـد گردیـد (Kargozari, Emam-Djomeh, & Moini, 2011). همـان‌گونـه کـه انتظـار می‌رفت، شاخص‌های SG و WL با افزایش زمان غوطه‌وری افزایش یافتند. منحنی‌های مشابهی در مورد میوه‌جات و سبزیجات اسمز شده مختلـف منتشـر شـده اسـت (Ganjloo *et al.*, 2012; García-Toledo *et al.*, 2016). با توجه به شکل 1 و 2 نرخ سریعتر SG و WL در زمان‌های ابتدایی فرایند اسمزی مشهود است کـه بـه دلیـل وجود گرادیان‌های فشار اسمزی بیشتر در مراحل ابتـدایی اسـت و بـا گذشت 120 دقیقه از آغاز فرایند محلول اسمزی رقیق‌تر شده و انتقال جرم به حالت تعـادلی مـی‌رسـد (Bahmani, Jafari, Shahidi, & 2015). یافته‌های تحقیقات پیشین نشان می‌دهد کـه مقـادیر SG و WL در محلول‌های اسمزی غلیظتر بالاتر بوده است (Park et al., 2002). این موضوع در مورد میزان بیشتر انتقال جرم در غلظت‌هـای بالاتر نمک و غلظت ثابت شربت گلـوکز در شـکل 1 و 2 مشـخص است. دمای بالاتر فرایند نیز منجر به تشدید انتقال جـرم مـی‌گـردد. تحقیقات نشان داده است که تخریب غشای سلولی در دمـای بـالاتر منجر به افزایش جذب مواد جامد در ساختارهای گیـاهی طـی تیمـار اسـمزی مـی‌شـود (Ciurzyńska, Kowalska, Czajkowska, & Lenart, 2016). به‌منظور جلوگیری از جذب مـواد جامـد از محلـول اسمزی استفاده از پوشش‌های خوراکی پیش از انجام فرایند آبگیـری اسمزی در مورد میوه‌جات و سبزیجات توصیه می‌شـود کـه در عـین حال تأثیر چندانی بر میزان حذف رطوبت ندارد (Saini, 2015).

معادلات Magee، Peleg و Page به‌منظور بررسی سینتیک‌های موجود در آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج به کار برده شـدند. یـک مدل ریاضی قابل قبول مدلی است که بتواند با شرایط واقعی فراینـد تطبیق داشته باشد و با دقت قابل قبولی تغییرات مورد نظر را تحلیـل کند.



شکل 1- مقادیر SG آزمایشی طی آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج در دماهای مختلف محلول اسمزی: 50°C (a)، 40°C (b)، 30° C (c)، و غلظت‌های مختلف نمک محلول اسمزی.



شکل 2- مقادیر WL آزمایشی طی آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج در دماهای مختلف محلول اسمزی: 50°C (a)، 40°C (b)، 30° C (c)، و غلظت‌های مختلف نمک محلول اسمزی.

جدول 1، 2 و3 به ترتیب، پارامترهای مدل و پارامترهای آماری مربوط به مدل Magee، Peleg و Page را تحت شرایط آزمایشی مختلف نشان می‌دهند. پارامترهای آماری آزمون شده شامل χ^2، R^2 و RMSE بودند. مقادیر R^2 در تمامی مدل¬های بررسی شده مقادیر نسبتاً بالایی داشته و در این میان استثناهایی وجود دارند که مقادیر پایین R2 در این موارد را می¬توان ناشی از خطای آزمایش دانست.

به منظور انتخاب بهترین مدل پیش¬بینی¬کننده منحنی انتقال جرم طی فرایند آبگیری اسمزی مکعب¬های هویج، بالاتر بودن ضریب تبیین، و کمتر بودن مقادیر کای دو و ریشه میانگین مربعات خطا مورد توجه قرار گرفتند.

جدول **1-** ضرایب مدل Magee و معیارهای ارزیابی مدل در شرایط مختلف آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج.

شماره نمونه	دمای محلول (°C)	نمک (%)	شربت گلوکز (%)	پارامترهای مدل Magee برای SG χ^2	RMSE	R^2	*K*	*A*	پارامترهای مدل Magee برای WL χ^2	RMSE	R^2	*K*	*A*
1	50	5	30	0/002	0/005	0/88	0/003	0/047	0/021	0/047	0/93	0/040	0/278
2	50	10	30	0/002	0/005	0/85	0/003	0/063	0/002	0/023	0/98	0/034	0/453
3	50	15	30	0/006	0/012	0/61	0/004	0/096	0/005	0/025	0/96	0/028	0/489
4	40	5	30	0/007	0/004	0/88	0/003	0/047	0/007	0/027	0/95	0/029	0/351
5	40	10	30	0/004	0/008	0/75	0/003	0/062	0/021	0/050	0/91	0/038	0/414
6	40	15	30	0/007	0/012	0/57	0/003	0/082	0/025	0/055	0/88	0/035	0/486
7	30	5	30	0/002	0/004	0/95	0/004	0/052	0/007	0/025	0/97	0/032	0/317
8	30	10	30	0/005	0/008	0/65	0/003	0/053	0/012	0/038	0/94	0/037	0/376
9	30	15	30	0/005	0/008	0/80	0/004	0/064	0/027	0/056	0/90	0/041	0/384
10	50	5	40	0/002	0/006	0/92	0/005	0/066	0/018	0/045	0/91	0/034	0/352
11	50	10	40	0/003	0/007	0/58	0/002	0/098	0/011	0/036	0/95	0/038	0/457
12	50	15	40	0/005	0/010	0/33	0/002	0/104	0/025	0/061	0/79	0/028	0/572
13	40	5	40	0/003	0/007	0/39	0/001	0/075	0/008	0/030	0/97	0/042	0/394
14	40	10	40	0/005	0/009	0/52	0/002	0/097	0/033	0/066	0/85	0/037	0/440
15	40	15	40	0/003	0/006	0/54	0/002	0/080	0/008	0/035	0/96	0/043	0/470
16	30	5	40	0/001	0/003	0/93	0/003	0/054	0/009	0/033	0/96	0/041	0/328
17	30	10	40	0/006	0/010	0/25	0/001	0/082	0/022	0/052	0/89	0/035	0/436
18	30	15	40	0/000	0/001	0/99	0/004	0/068	0/010	0/036	0/96	0/041	0/409
19	50	5	50	0/005	0/008	0/42	0/002	0/072	0/009	0/034	0/95	0/038	0/500
20	50	10	50	0/004	0/007	0/65	0/002	0/065	0/026	0/064	0/92	0/053	0/469
21	50	15	50	0/002	0/006	0/74	0/002	0/093	0/054	0/092	0/74	0/037	0/621
22	40	5	50	0/004	0/007	0/54	0/002	0/061	0/016	0/047	0/95	0/052	0/402
23	40	10	50	0/002	0/005	0/94	0/005	0/054	0/029	0/062	0/92	0/051	0/424
24	40	15	50	0/003	0/007	0/46	0/001	0/088	0/032	0/072	0/88	0/048	0/513
25	30	5	50	0/001	0/003	0/89	0/002	0/049	0/017	0/046	0/94	0/043	0/404
26	30	10	50	0/024	0/007	0/74	0/003	0/063	0/024	0/053	0/92	0/044	0/437
27	30	15	50	0/013	0/010	0/65	0/003	0/067	0/007	0/033	0/97	0/044	0/493

نتایج نشان داد که داده‌های آزمایشی WL در فرایند آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج، برازش خوبی با هر سه مدل Magee، Peleg و Page با مقادیر میانگین ضرایب تبیین به‌ترتیب 0/92، 0/96 و 0/97 ومیانگین مقادیر RMSE 0/046، 0/031 و 0/027 و میانگین مقادیر مربع کای 0/006، 0/008 و 0/006 داشتند. این درحالی بود که با در نظر گرفتن پارامتر ضریب تبیین به‌عنوان شاخص مناسب بودن مدل[1]، داده‌های آزمایشی SG نسبت به داده‌های افت رطوبت برازش کمتری با مدل‌های ارائه شده نشان دادند. مقادیر میانگین ضرایب تبیین برای SG طی فرایند آبگیری اسمزی به ترتیب 0/68، 0/81 و 0/79 ومیانگین مقادیر RMSE 0/007، 0/005 و 0/006 و میانگین مقادیر مربع کای 0/005، 0/003 و 0/002 ثبت شدند. با توجه به نتایج برازش مدل عنوان شده در جداول 1، 2 و 3 و با در نظر گرفتن مقادیر میانگین پارامترهای ارزیابی مدل R^2 ، χ^2 و RMSE، چنین نتیجه گیری شد که مدل‌های پیشنهادی Peleg و همکاران (چند جمله‌ای درجه دو[2]) و مدل پیشنهادی Page و همکاران (لگاریتمی[3]) نسبت به مدل پیشنهادی Magee و همکاران (چند جمله‌ای درجه دو) قابلیت بیشتری برای توصیف سینتیک انتقال جرم در فرایند آبگیری اسمزی هویج دارند.

1 Model goodness

2 Second order polynomial

3 Logarithmic

جدول 2- ضرایب مدل Peleg و معیارهای ارزیابی مدل در شرایط مختلف آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج.

پارامترهای مدل Peleg برای WL					پارامترهای مدل Peleg برای SG					شربت گلوکز (%)	نمک (%)	دمای محلول (°C)	شماره نمونه
$1/K_1$	$1/K_2$	R^2	RMSE	χ^2	$1/K_1$	$1/K_2$	R^2	RMSE	χ^2				
0/038	0/921	0/98	0/024	0/006	0/008	0/095	0/96	0/003	0/000	30	5	50	1
0/074	0/961	0/91	0/044	0/015	0/014	0/105	0/67	0/008	0/004	30	10	50	2
0/088	0/904	0/91	0/035	0/009	0/018	0/151	0/83	0/008	0/003	30	15	50	3
0/053	0/800	0/97	0/021	0/005	0/008	0/088	0/82	0/005	0/006	30	5	40	4
0/059	0/001	0/99	0/020	0/004	0/010	0/114	0/93	0/004	0/001	30	10	40	5
0/074	1/032	0/99	0/016	0/002	0/016	0/132	0/66	0/010	0/006	30	15	40	6
0/046	0/813	0/96	0/027	0/008	0/008	0/121	0/95	0/004	0/001	30	5	30	7
0/054	0/958	0/97	0/027	0/008	0/009	0/093	0/83	0/005	0/002	30	10	30	8
0/053	1/032	1/00	0/010	0/001	0/010	0/125	0/93	0/005	0/002	30	15	30	9
0/051	0/875	0/95	0/034	0/010	0/010	0/141	0/93	0/006	0/002	40	5	50	10
0/069	1/043	0/96	0/031	0/008	0/026	0/129	0/93	0/003	0/000	40	10	50	11
0/101	0/995	0/91	0/039	0/010	0/034	0/129	0/51	0/008	0/003	40	15	50	12
0/057	1/040	0/95	0/039	0/012	0/022	0/096	0/66	0/005	0/002	40	5	40	13
0/063	1/024	0/98	0/027	0/005	0/024	0/133	0/84	0/005	0/002	40	10	40	14
0/070	1/123	0/91	0/054	0/024	0/021	0/105	0/88	0/003	0/001	40	15	40	15
0/045	0/979	0/96	0/037	0/015	0/010	0/096	0/88	0/004	0/001	40	5	30	16
0/064	0/981	0/98	0/020	0/003	0/024	0/104	0/45	0/009	0/004	40	10	30	17
0/059	1/054	0/96	0/034	0/010	0/012	0/134	0/89	0/006	0/002	40	15	30	18
0/078	1/073	0/95	0/036	0/009	0/016	0/099	0/78	0/005	0/002	50	5	50	19
0/065	1/301	0/98	0/033	0/007	0/014	0/100	0/69	0/007	0/005	50	10	50	20
0/095	1/205	0/96	0/037	0/000	0/023	0/130	0/93	0/003	0/001	50	15	50	21
0/056	1/229	0/98	0/031	0/008	0/014	0/088	0/58	0/007	0/004	50	5	40	22
0/059	1/242	0/99	0/018	0/002	0/008	0/128	0/93	0/006	0/002	50	10	40	23
0/073	1/261	0/95	0/046	0/015	0/027	0/111	0/78	0/004	0/001	50	15	40	24
0/057	1/084	0/99	0/021	0/004	0/012	0/073	0/76	0/004	0/001	50	5	30	25
0/063	1/121	0/98	0/028	0/005	0/011	0/108	0/93	0/004	0/001	50	10	30	26
0/074	1/170	0/92	0/053	0/020	0/012	0/116	0/89	0/005	0/007	50	15	30	27

نتایج ما مشابه نتایج به‌دست آمده توسط Ganjloo و همکاران (2012) بود که چنین دریافتند که در بررسی سینتیک آبگیری اسمزی گواوای بی‌دانه، در میان مدل‌های Azuara، Peleg و Page مدل نیمه‌تجربی Peleg به‌طور رضایت بخشی سینتیک آبگیری اسمزی گواوا را توصیف نمود. در این مطالعه پارامترهای آماری R^2، E (شاخص میانگین پراکندگی نسبی[4]) و RMSE، به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل مورد توجه قرار گرفتند (Ganjloo *et al.*, 2012). همچنین Bahmani و همکاران (1394) در بررسی سینتیک انتقال جرم طی فرایند آبگیری اسمزی حلقه‌های بادمجان چنین بیان کردند که مدل Magee نسبت به مدل Azuara، قابلیت کمتری در توصیف سینتیک انتقال جرم دارد. در این تحقیق R^2، SSE (مجموع مربعات خطا[5]) و RMSE پارامترهای ارزیابی مدل بودند (Bahmani *et al.*, 2015). شکل‌های 3-5 مقادیر جذب ماده جامد و افت رطوبت به‌دست آمده آزمایشی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های Peleg، Magee و Page در غلظت شربت گلوکز 30% و دمای 50°C و غلظت‌های نمک 15، 10 و 5 درصد را نشان می‌دهد. خطوط روند[6] ترسیم‌شده برای داده‌های پیش‌بینی‌شده با توجه به نوع معادلات انتخاب شده‌است. همانگونه که در شکل 4 و 5 مشاهده

4 Mean relative deviation modulus (E)

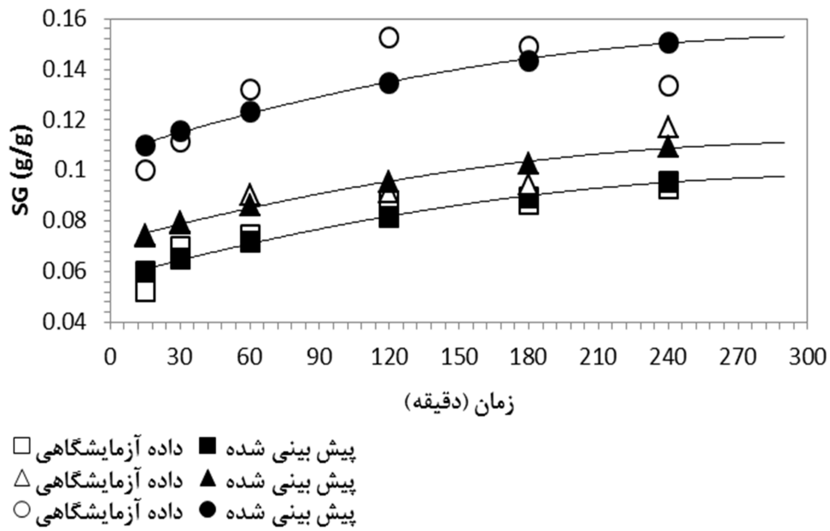
5 Square sum of errors

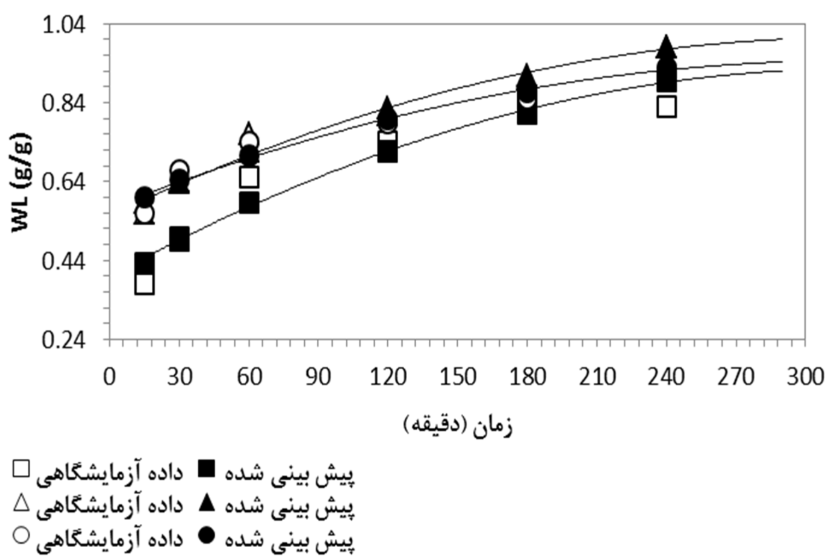
6 Trendline

می‌شود مدل‌های Peleg و Page نسبت بـه مـدل Magee تطـابق بیشتری با داده‌های آزمایشی نشان می‌دهند. در مطالعه حاضر مدل Magee کمترین برازش را با داده‌های تجربی شاخص انتقـال جـرم SG (R^2=0/68) نشان داد. این یافته با نتایج به‌دست آمـده توسـط Singh و همکاران (2007) متفاوت بود. در ایـن تحقیـق سـینتیک انتقال جرم طی فرایند آبگیری اسـمزی قطعـات هـویج در محلـول اسمزی ساکارز و نمک مورد مطالعه قرار گرفت. در میان مدل‌هـای بررسی شده شامل مدل Penetration، Azuara و Magee، جـذب مواد جامد به خوبی توسط مدل Magee نمایش داده شد (Singh *et al.*, 2007). این موضوع می‌تواند در نتیجه تفـاوت شـرایط فراینـد آبگیری اسمزی در دو مطالعه به ویژه نوع ترکیبات و غلظت آنها در محلول اسمزی باشد

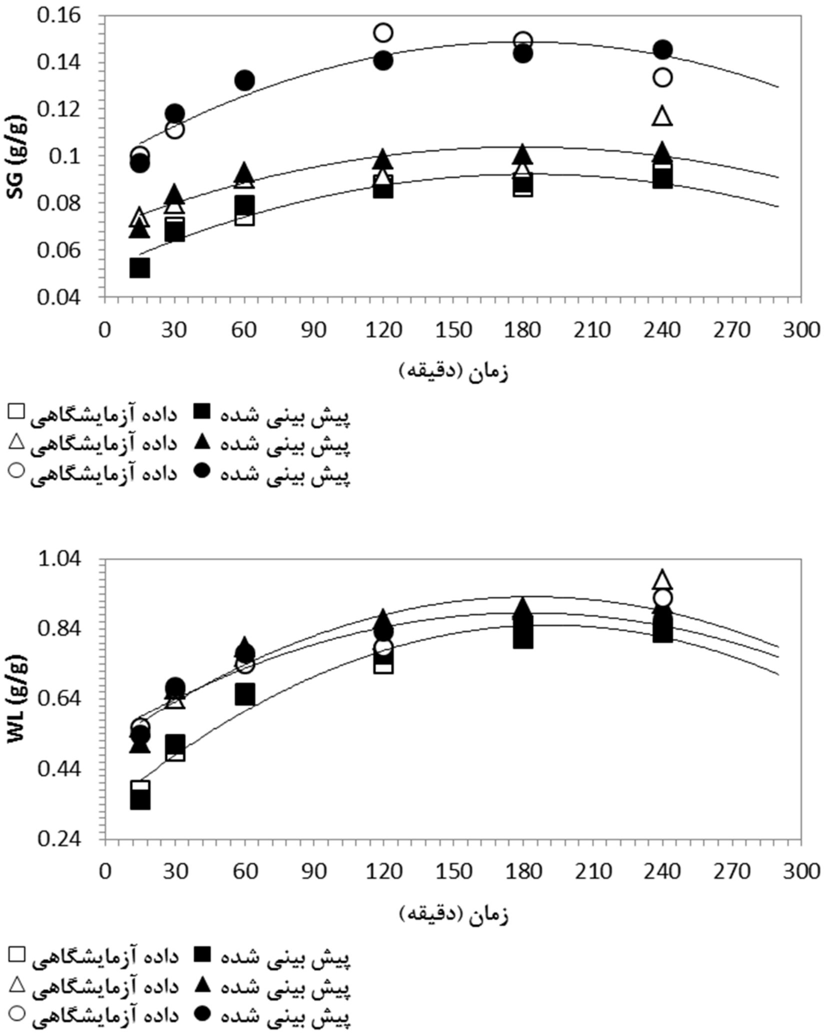
جدول 3- ضرایب مدل Page و معیارهای ارزیابی مدل در شرایط مختلف آبگیری اسمزی مکعب‌های هویج.

شماره نمونه	دمای محلول (°C)	نمک (%)	شربت گلوکز (%)	پارامترهای مدل Page برای SG					پارامترهای مدل Page برای WL				
				χ^2	RMSE	R^2	n	K	χ^2	RMSE	R^2	n	K
1	50	5	30	0/001	0/003	0/96	0/530	0/207	0/005	0/025	0/98	0/717	0/082
2	50	10	30	0/003	0/007	0/77	0/306	0/416	0/007	0/032	0/95	0/453	0/236
3	50	15	30	0/005	0/011	0/68	0/725	0/183	0/005	0/026	0/95	0/414	0/300
4	40	5	30	0/015	0/005	0/85	0/510	0/249	0/002	0/014	0/99	0/557	0/171
5	40	10	30	0/001	0/004	0/93	0/700	0/144	0/002	0/016	0/99	0/616	0/135
6	40	15	30	0/010	0/013	0/45	0/617	0/269	0/002	0/017	0/99	0/575	0/167
7	30	5	30	0/001	0/003	0/97	0/517	0/184	0/003	0/019	0/98	0/538	0/159
8	30	10	30	0/002	0/005	0/84	0/682	0/155	0/003	0/019	0/99	0/580	0/144
9	30	15	30	0/002	0/006	0/91	0/542	0/201	0/001	0/010	1/00	0/674	0/105
10	50	5	40	0/001	0/005	0/94	0/568	0/180	0/009	0/035	0/94	0/636	0/131
11	50	10	40	0/000	0/003	0/93	0/778	0/184	0/004	0/022	0/98	0/534	0/179
12	50	15	40	0/007	0/011	0/07	1/724	0/020	0/015	0/048	0/87	0/664	0/181
13	40	5	40	0/002	0/005	0/64	0/665	0/233	0/006	0/028	0/97	0/554	0/151
14	40	10	40	0/001	0/003	0/94	1/473	0/024	0/007	0/032	0/96	0/747	0/100
15	40	15	40	0/000	0/003	0/92	0/763	0/182	0/014	0/044	0/94	0/542	0/175
16	30	5	40	0/001	0/003	0/93	0/419	0/310	0/009	0/031	0/97	0/625	0/116
17	30	10	40	0/006	0/009	0/36	2/405	0/003	0/003	0/021	0/98	0/657	0/132
18	30	15	40	0/001	0/004	0/95	0/442	0/266	0/005	0/026	0/98	0/588	0/142
19	50	5	50	0/003	0/006	0/68	2/370	0/002	0/005	0/029	0/97	0/530	0/197
20	50	10	50	0/005	0/007	0/69	0/328	0/44	0/007	0/034	0/98	0/677	0/105
21	50	15	50	0/001	0/003	0/93	0/532	0/325	0/010	0/041	0/95	0/840	0/090
22	40	5	50	0/004	0/007	0/58	0/513	0/350	0/004	0/024	0/99	0/635	0/108
23	40	10	50	0/001	0/005	0/95	0/488	0/190	0/002	0/017	0/99	0/644	0/107
24	40	15	50	0/001	0/004	0/76	0/665	0/281	0/015	0/047	0/95	0/683	0/115
25	30	5	50	0/001	0/003	0/83	0/301	0/520	0/002	0/015	0/99	0/610	0/126
26	30	10	50	0/001	0/005	0/90	0/716	0/154	0/005	0/026	0/98	0/571	0/144
27	30	15	50	0/002	0/005	0/89	0/740	0/121	0/010	0/039	0/96	0/518	0/183

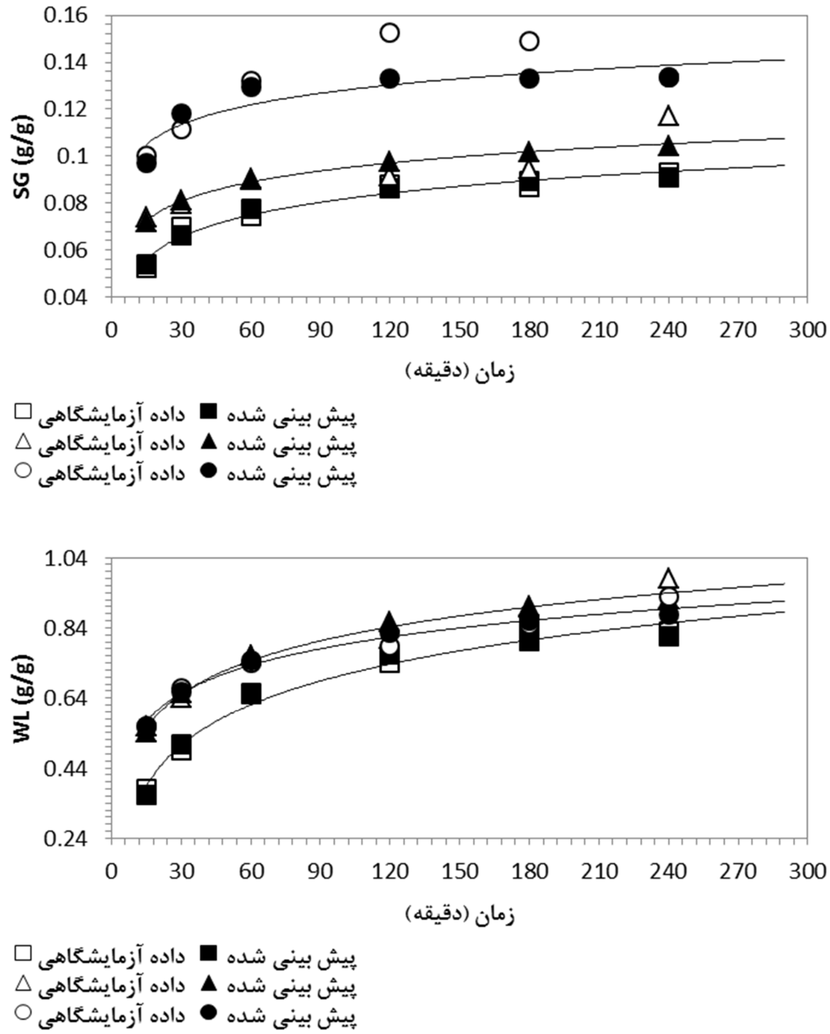




شکل 3- مقادیر SG و WL به دست آمده‌ی آزمایشی و پیش‌بینی شده توسط مدل Magee در غلظت شربت گلوکز 30% و دمای 50°C و غلظت نمک 15% (○)، 10% (△) و 5% (□)؛ خطوط روند چند جمله‌ای درجه دو برای داده‌های پیش‌بینی‌شده رسم شده‌است.



شکل 4- مقادیر SG و WL به دست آمده‌ی آزمایشی و پیش‌بینی شده توسط مدل Peleg در غلظت شربت گلوکز 30% و دمای 50°C و غلظت نمک 15% (○)، 10% (△) و 5% (□)؛ خطوط روند چند جمله‌ای درجه دو برای داده‌های پیش‌بینی‌شده رسم شده‌است.



شکل 5- مقادیر SG و WL به دست آمده‌ی آزمایشی و پیش‌بینی شده توسط مدل Page در غلظت شربت گلوکز 30% و دمای 50°C و غلظت نمک 15% (○)، 10% (△) و 5% (□)؛ خطوط روند لگاریتمی برای داده‌های پیش‌بینی‌شده رسم شده‌است.

نتیجه‌گیری

عملیات آبگیری اسمزی به طور گسترده‌ای بـه عنـوان مرحلـه‌ی بالادستی پیش از فرایندهایی نظیر انجماد، خشک کردن با هوای داغ، خشک کردن تحت خلأ و خشک کردن انجمادی انجام می‌گیرد. این پیش‌تیمار به منظور افزایش کیفیت حسی، تغذیه‌ای و فراسودمندی و با حفظ یکپارچگی[7] فراورده‌های نهایی به کار برده می‌شود.

به منظور دستیابی به خصوصیات مطلـوب فـراورده‌هـای غـذایی نیازمند درک فرایند و کنترل شرایط فرایند هستیم. مدل‌ها مؤلفه‌های اصلی (شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و کنترل) شیوه‌های مهندسی سیستم-های فرایند مدرن به شمار می‌روند. مدل‌های نیمه تجربـی متعـددی برای توصیف انتقال جرم در طول آبگیری اسمزی محصولات غذایی گزارش شده است. در این پژوهش فراینـد آبگیـری اسـمزی قطعـات مکعبی شکل هویج تحت شرایط گوناگون آبگیری مطالعه شد. نتـایج برازش مدل های سینتیکی نشان داد که مدل‌های پیشنهادی Peleg و همکاران (چنـد جملـه‌ای درجـه دو[8]) و مـدل پیشـنهادی Page و همکاران (لگاریتمی[9]) نسبت به مدل پیشنهادی Magee و همکـاران

7 Integrity

8 Second order polynomial
9 Logarithmic

(چند جمله‌ای درجه دو) قابلیت بیشتری برای توصیف سینتیک انتقال جرم در فرایند آبگیری اسمزی هویج دارند. این نتیجه‌گیری با در نظر گرفتن مقادیر میانگین پارامترهـای ارزیـابی مـدل شـامل حـداکثر R^2بالاتر و حداقل χ^2 و RMSE انجام شد. بدین ترتیـب مـدل‌هـای ارائه شده توسـط Peleg و Page نسـبت بـه مـدل Magee قابلیـت بهتری در پیش‌بینی سینتیک‌های فرایند آبگیری اسمزی و مقادیر SG و WL تعادلی دارند.

منابع

Ahmed, I., Qazi, I. M., & Jamal, S., 2016, Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 29-43 .

Bahmani, A. A., Jafari, S. M., & Shahidi, S. A., 2015, Kinetic modeling of mass transfer during osmotic dehydration of eggplant (*Solanum Melongena* L.). *Iranian Journal of Food Technology and Nutrition*, 12(3), 65-76 .

Bashari, S. T., Hamid, Mokhtarian, M., 2015, Monitoring of thin layer drying kinetics of Rhubarb during ultrasound-osmotic dehydration process. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 46(3), 255-263 .

Chavan, U., & Amarowicz, R., 2012, Osmotic dehydration process for preservation of fruits and vegetables. *Journal of Food Research*, 1(2), 202-215.

Ciurzyńska, A., Kowalska, H., Czajkowska, K., & Lenart, A., 2016, Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. *Trends in Food Science & Technology*, 50, 186-192 .

Datta, A. K., 2008, Status of Physics-Based Models in the Design of Food Products, *Processes, and Equipment. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 121-129 .

Datta, A. K., & Halder, A., 2008, Status of food process modeling and where do we go from here (synthesis of the outcome from brainstorming). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 117-120 .

Ganjloo, A., Rahman, R. A., Bakar, J., Osman, A., & Bimakr, M., 2012, Kinetics modeling of mass transfer using Peleg’s equation during osmotic dehydration of seedless guava (*Psidium guajava* L.): effect of process parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2151-2159 .

García-Toledo, J. A., Ruiz-López, I. I., Martínez-Sánchez, C. E., Rodríguez-Miranda, J., Carmona-García, R., Torruco-Uco, J. G., Herman-Lara, E., 2016, Effect of osmotic dehydration on the physical and chemical properties of Mexican ginger (Zingiber officinale var. Grand Cayman). CyTA-*Journal of Food*, 14(1), 27-34 .

Harris, D. C., 1998, Nonlinear least-squares curve fitting with Microsoft Excel Solver .*Journal of chemical education*, 75(1), 119-130 .

Hathan, B. S., 2015, Studies on Mass Transfer and Diffusion Coefficients in Elephant Foot Yam (*Amorphophallus* spp.) during osmotic dehydration in sodium chloride solution. Journal of food processing and preservation, DOI: 10.1111/jfpp.12631.

Hii, C., Law, C., & Cloke, M., 2009, Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 191-198 .

Horwutz, W., 2000, Official methods of analysis of AOAC International. 17th edn. vol .1 .AOAC Int, Gaithersburg, MD .

Ivester, R. W., 2008, Productivity improvement through modeling: an overview of manufacturing experience for the food industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 182-191 .

Júnior, B., Lucena, J ,.Cordeiro Mancini, M., & Hubinger, M. D., 2013, Mass transfer kinetics and mathematical modelling of the osmotic dehydration of orange-fleshed honeydew melon in corn syrup and sucrose solutions. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(12) ,2463-2473.

Kargozari, M., Emam-Djomeh, Z., & Moini, S., 2011, Optimization of osmotic dehydration of carrot cubes using response surface methodology. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 42(2), 215-224.

Kargozari, M., Moini, S., & Emam-Djomeh, Z., 2010, Prediction of some physical properties of osmodehydrated carrot cubes using response surface methodology. *Journal of food processing and preservation*, 34(6), 1041-1063 .

Moreira, R., & Sereno, A. M., 2003, Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 25-31 .

Park, K. J., Bin, A., Brod, F .P. R., & Park, T. H. K. B., 2002, Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou (*Pyrus communis* L.). *Journal of Food Engineering*, 52(3), 293-298 .

Pavelkić, V. M., Brdarić, T. P., Petrović, M. P., Šekularac, G. M., Košević, M. G., Pezo, L. L., & Ilić, M .A., 2015, Application of Peleg model on mass transfer kinetics during osmotic dehydratation of pear cubes in sucrose solution. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 21(4), 485-492 .

Saini, C., 2015, Mass Transfer Kinetics during Osmotic Dehydration of Pineapple Samples Coated with Pectin. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 8(2), 467-476 .

Singh, B., Kumar, A., & Gupta, A., 2007, Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 471-480 .

Souraki, B. A., Ghaffari, A., & Bayat, Y., 2012, Mathematical modeling of moisture and solute diffusion in the cylindrical green bean during osmotic dehydration in salt solution. *Food and bioproducts processing*, 90(1), 64-71 .
Sutar, P., & Gupta, D., 2007, Mathematical modeling of mass transfer in osmotic dehydration of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 90-97 .
Van Boekel, M. A., 2008, Kinetic modeling of food quality: a critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 144-158 .
Yadav, A. K., & Singh, S. V., 2014, Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 51(9), 1654-1673 .

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 13, No. 5, Dec- Jan 2018, p. 704-719

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 13، شماره 5، آذر - دی 1396، ص. 719-704

Mass transfer kinetics and mathematical modeling of the osmotic dehydration of carrot cubes in glucose syrup and salt solutions

M. Kargozari[10*], M. Jamshid-Eini

Received: 2016.05.24
Accepted: 2016.10.22

Introduction: The osmotically dehydrated carrots can be added directly into soups, stews or can be used in a broad range of food formulations including instant soups, snack seasoning and etc. Osmotic dehydration is a suitable way to produce the shelf-stable products or partially dehydrated foods ready to place in other complementary processes such as air-drying, freezing and others. Modeling can certainly make differences in the food industry, leading to reduced costs and increased profitability. In food technology, at the simplest level, there are equations that determine the relationship between two or more variable. Simulation models in operation units and food preservation systems have attracted much attention in the past four decades. The mathematical equations describing mass transfer during osmotic dehydration, allow a better understanding of the composition of the material and operating parameters during dewatering. In this regard, many experimental and theoretical models have been reported in the literature but experimental models have more popularity because of easier applications. Regarding the classification of modeling in food processes, kinetic models are classified among theoretical models. It was ideal if we could use kinetic models based on fundamental scientific theories for the purposes of prediction and controlling the changes that occur in real food systems. But the complexity of the food makes the direct application of basic models impossible. The alternative is the direct study of kinetics on real food. As a result, the obtained models would be experimental or semi-experimental. Kinetics has developed as a powerful tool in modeling food quality features and in other words the modeling of food quality estimation is almost equivalent to the modeling of reaction kinetics in foods. The present study aimed to evaluate kinetics of osmotic dehydration of carrot cubes in terms of solid gain and water loss, which was studied at three glucose syrup concentration levels (30, 40 and 50% w/w), three salt concentration levels (5, 10 and 15% w/w) and three temperature levels of osmotic solution (30, 40 and 50°C) for 240 min. The experimental data were fitted to different semi-empirical kinetic models including Magee, Peleg and Page.

Materials and methods: Fresh well graded carrots were washed and peeled manually. A vegetable dicer was used to prepare carrot cubes of dimensions 1 cm× 1cm× 1 cm. The cubes were washed with fresh water to remove the carrot fines adhered to the surface of the fruit. The initial moisture content of the fresh carrot cubes varied from 86% to 90% (wet basis). Considering the greater effectiveness of a mixture of solutes over a single solute, a binary solution of salt and glucose syrup was used as the osmotic solution. The samples were excluded from the osmotic solution after 15, 30, 60, 120, 180 and 240 minutes. Carrot cubes were then washed with deionized distilled water, and were dried using a paper towel. Evaluation of mass exchange between the solution and sample during osmotic dehydration were made by using water loss and solid gain parameters. The experimental data were then fitted to different semi-empirical kinetic models including Magee, Peleg and Page which are widely used in biologic fields and the parameters of the models were determined. Data fitting was conducted using Microsoft Excel spreadsheet (Microsoft Office, 2010) using SOLVER add-in. Coefficient of determination (R^2), chi-squared (χ^2) and root mean square error (RMSE) were used to determine the best suitable model. An analysis of variance was conducted to determine the significant effects of process variables on solid gain and water loss.

Results and Discussion: At the beginning of the osmotic dehydration process, because of the high osmotic driving force between the concentrated solution and the fresh sample, the rate of water removal and solid gain was relatively high. Although water loss reached nearly the equilibrium conditions towards the late processing times, solid gain kept increasing. This increase in solid gain blocks the surface layers of the product, which reduces the concentration gradient between the product and osmotic solution, posing an additional resistance to mass exchange and lowering the rates of water loss at further processing times. It was also observed that while increasing the salt concentration, the solid gain in most of the samples significantly (p<0.05) increased but salt

10 Department of Food Science, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran
(*Corresponding Author: mina_kargozari@ut.ac.ir)

concentration had no significant effect on the osmotic dehydration of carrot cubes.

Among the models applied, Peleg model well represented the experimental data for solid gain (R^2=0.81, χ^2=0.006, RMSE= 0.027); whereas water loss was well represented by the Page model (R^2=0.97, χ^2=0.003, RMSE= 0.005). Curves related to experimental data as well as predicted data by Magee; Peleg and Page models were drawn. It was observed that proposed models by Peleg and Page, compared to Magee's model, were better able to predict the osmotic dehydration process kinetics and equilibrium values of SG and WL.

Key words: Osmotic Dehydration, Mass Transfer Kinetics, Mathematical Modeling, Model Fit, Carrot.